

А.И. Абрамочкин, В.В. Занин, И.Э. Пеннер,
А.А. Тихомиров, В.С. Шаманаев

САМОЛЕТНЫЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ЛИДАРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

Приведено описание и технические характеристики самолетных поляризационных лидаров для зондирования плотных оптических сред, разработанных в ИОА и СКБ НИП «Оптика» СО АН СССР. Детально рассмотрен многофункциональный лидар «Светозар–3», предназначенный для дистанционного анализа ориентированных анизотропных частиц в атмосфере, учета многократного рассеяния, для работы на двух длинах волн. Представлен также специализированный лидар «Макрель–2», созданный для зондирования водной среды с борта самолета. Приведены результаты экспериментальных исследований.

Лидарные системы, размещенные на мобильных носителях, позволяют проводить дистанционное зондирование окружающей среды на обширных территориях, а также исследовать локальные образования в атмосфере и гидросфере с близких расстояний. Наиболее подходящим носителем мобильного лидара является самолет, имеющий точное навигационное оборудование и метеоприборы, что обеспечивает проведение сопутствующих измерений. Первый самолетный лидар был создан в Стенфордском исследовательском институте (США) в конце 60-х годов [1]. Почти одновременно в Центральной аэрологической обсерватории разработан лидар ЛР–2 [2], который был опробован на самолете. Модификацией его явился лидар ЛР–ЗП, имеющий две приемные системы, используемые для анализа двух ортогональных поляризационных компонент излучения, рассеянного облаками, туманами и подстилающими поверхностями, в самолетных наблюдениях [3].

Исследование поляризационных характеристик лидарных сигналов расширяет возможности метода одночастотного лазерного зондирования, особенно при изучении плотных рассеивающих сред [4], поэтому в Институте оптики атмосферы и СКБ НИП «Оптика» практически сразу пошли по пути создания лидаров, использующих поляризационные методы зондирования. В одном из первых самолетных поляризационных лидаров «Светозар–2» [5] для разделения ортогональных компонент обратнорассеянного излучения в приемной системе была применена призма Волластона, что позволило сократить один приемный канал по сравнению с лидаром ЛР–ЗП, существенно уменьшить весогабаритные характеристики лидара и упростить методику его калибровки.

Дальнейшие разработки ИОА и СКБ НИП «Оптика» по самолетным лидарам были направлены на совершенствование поляризационных систем. Был сконструирован и изготовлен многофункциональный лидар «Светозар–3» [6] (рис. 1). В передатчике его использован гранатовый лазер, излучающий на длинах волн 532 и 1064 нм импульсы длительностью 10÷15 нс с энергией до 10 мДж (на второй гармонике). Расходимость излучения на выходе коллиматора 1 мрад. Частота посылок зондирующих импульсов до 20 Гц. Имеется возможность преобразования исходного линейного состояния поляризации лазерного излучения в круговое (при установке в передающий тракт четвертьволновой фазовой пластины) или линейное с любым углом наклона плоскости поляризации (при дополнительном введении и вращении призмы Глана) без изменения положения самого лазера. Используемый светоделительный блок позволяет измерять энергию зондирующего импульса независимо от поляризации падающего излучения. Прием обратнорассеянного излучения осуществляется тремя идентичными приемными системами. В каждой из них детектируются две ортогональные компоненты принимаемого излучения, которые разделяются анализатором — призмой Волластона. При этом в конструкции обеспечена возможность одновременного вращения плоскости анализатора и обоих фотодетекторов в пределах $\pm 90^\circ$ в зависимости от положения плоскости поляризации зондирующего излучения. В качестве фотодетекторов используются ФЭУ–83 или ФЭУ–84 (в зависимости от регистрируемой длины волны излучения). В одной из приемных систем перед анализатором дополнительно установлена четвертьволновая пластина, что при соответствующей взаимной ориентации анализаторов в каждой из приемных систем позволяет определять все четыре компоненты вектор–параметра Стокса регистрируемого лидарного сигнала. В каждой приемной системе имеется возможность дискретного изменения углов поля зрения, что обеспечивает регистрацию многократно рассеянного излучения. Система регистрации имеет шестиразрядный АЦП с шагом квантования 25 нс, дисковый накопитель и мини–ЭВМ с дисплеем, осциллограф. Была разработана специальная методика энергетической и поляризационной калибровки лидара, имеющего шесть ФЭУ [6].

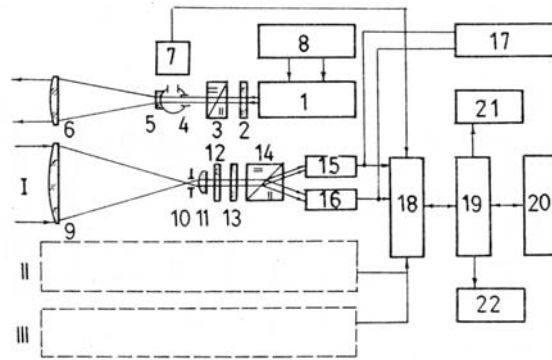


Рис. 1. Схема лидара «Светозар-3»: 1 – лазер; 2 – фазовая пластина; 3 – призма Глана; 4 – светорассеивающая полость; 5, 6 – линзы коллиматора; 7 – фотоэлемент; 8 – система энергообеспечения лазера; 9 – объектив приемника; 10 – полевая диафрагма; 11 – линза Фабри; 12 – фазовая пластина; 13 – интерференционный светофильтр; 14 – призма Волластона; 15, 16 – фотоумножители; 17 – осциллограф; 18 – аналого-цифровой преобразователь; 19 – интерфейс; 20 – микро-ЭВМ; 21 – графопостроитель; 22 – дисковый магнитофон
I, II, III – оптические каналы приемника лидара

Лидар «Светозар-3» обеспечивает следующие режимы измерений:

- определение параметров Стокса лидарного сигнала на длине волны 532 нм при линейной и циркулярной поляризации зондирующего излучения;
- определение степени линейной деполаризации обратнорассеянного излучения на длинах волн 532 и 1064 нм одновременно при линейной поляризации зондирующего излучения;
- определение степени линейной деполаризации на одной длине волны зондирования при трех различных углах поля зрения одновременно, при линейной поляризации зондирующего излучения.

Масса приемопередатчика не превышает 120 кг, а масса стоек электропитания и регистрации не более 100 кг. Лидар размещен на поворотной платформе, обеспечивающей сканирование по азимуту $\pm 180^\circ$ по углу места от $\pm 90^\circ$ до -45° и фиксированную установку в надир (-90°). Это позволяет использовать лидар не только в самолетных экспериментах (при зондировании через специальный люк в дне фюзеляжа самолета или в открытую дверь), но и при наземном размещении лидара в фургоне автомобиля либо стационарно. Поворот в заданное направление зондирования осуществляется вручную.

После наземной калибровки лидар был испытан в полетах на самолетах Ил-14 ФКМ и Ил-18 ДОРР [7]. Зондировались облака и водная среда. Лидар показал следующие возможности: дальность зондирования атмосферы в горизонтальном направлении у поверхности земли до 1 км; дальность обнаружения облаков – до 5 км; глубина зондирования облаков на дистанции 1 км – до 0,3 км; глубина зондирования морской воды с высоты полета 0,4 км – до 20 м. При зондировании водной среды, кроме использования в задачах батиметрии, лидар был опробован для поиска рыбных косяков. Результаты комплексных экспериментов, проведенных совместно с рыболовецкими судами в акваториях Баренцева моря и Тихого океана, показали большие возможности самолетного лидара для обнаружения рыбных скоплений.

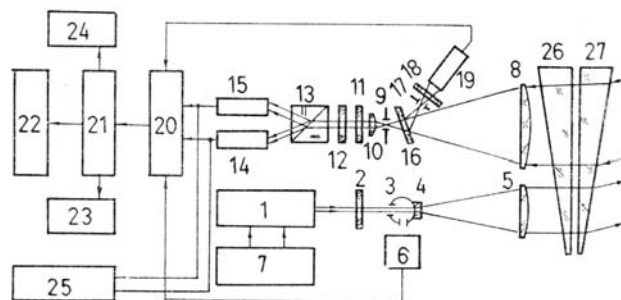


Рис. 2. Схема лидара «Макрель-2»: 1 – лазер; 2 – фазовая пластина; 3 – светорассеивающая полость; 4, 5 – линзы коллиматора; 6 – фотоэлемент; 7 – система энергообеспечения лазера; 8 – объектив приемника; 9 – полевая диафрагма; 10 – линза Фабри; 11 – фазовая пластина; 12 – интерференционный светофильтр; 13 – призма Волластона; 14, 15 – фотоумножители; 16 – светоделительное интерференционное зеркало; 17 – полевая диафрагма; 18 – интерференционный светофильтр; 19 – фотоумножитель люминесцентного канала; 20 – аналого-цифровой преобразователь; 21 – интерфейс; 22 – микро-ЭВМ; 23 – графопостроитель; 24 – дисковый магнитофон; 25 – осциллограф; 26, 27 – оптические клинья

На основе опыта, полученного при разработке и испытаниях лидара «Светозар–3», создан образец специализированного лидара «Макрель–2» для зондирования гидросферы с борта самолета (рис. 2). Его передающий канал по сравнению с лидаром «Светозар–3» упрощен (исключена призма Глана). Для увеличения чувствительности лидара диаметр приемной апертуры был увеличен в 1,5 раза (до 150 мм).

Использован один приемный объектив с тремя регистрирующими каналами (два поляризационных и один люминесцентный, который предназначен для обнаружения биологически продуктивных зон в морской среде). При зондировании гидросферы с борта самолета большой проблемой является уменьшение сигнала от границы раздела воздух – вода, поэтому для сокращения динамического диапазона сигналов, поступающих в АЦП, используется временная регулировка чувствительности фотоэлектронных умножителей. Это позволяет выделять в поляризационных каналах сигналы от подводных объектов на фоне большого сигнала, обусловленного зеркальным и диффузным отражениями от морской поверхности. Лидар работает через специальный люк, сделанный в днище фюзеляжа самолета. Для увеличения площади зондирования, охватываемой при полете, используется сканирующее устройство, представляющее собой два оптических клина, апертура которых охватывает приемопередатчик лидара (см. рис. 2). Использование комбинации из двух клиньев позволяет обеспечить отклонение зондирующего луча до 15° от направления в надир. При синфазном вращении клиньев вокруг оси приемопередатчика обеспечивается сканирование водной поверхности по образующей конуса, а при ортофазном вращении – по прямой, перпендикулярной линии полета.

Для калибровки лидара после изготовления проводились его предполетные испытания на специально оборудованной трассе, где были установлены сетки различной плотности, т.е. с разными коэффициентами диффузного рассеяния. Осуществлялось выравнивание чувствительности приемных поляризационных каналов, проверка системы обработки и регистрации сигналов. Была оценена пространственная разрешающая способность оптико–электронного тракта (без АЦП), которая не превышает 4,0 м (в воздухе), усовершенствована методика поляризационных измерений.

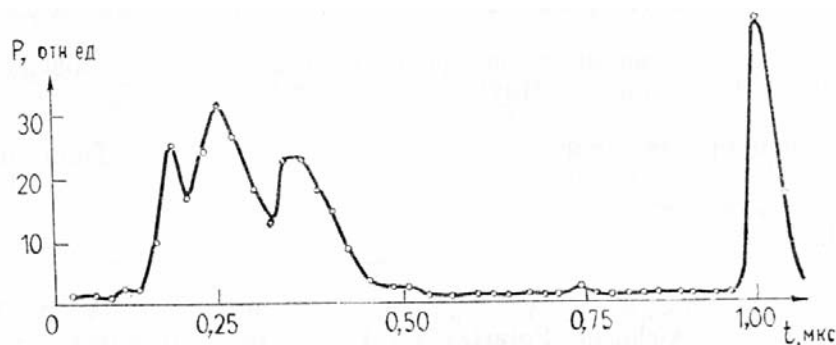


Рис. 3. Лидарный сигнал при зондировании воды из приводного тумана

Проведенные испытания лидара «Макрель–2» на самолете Ил–18 ДОРП показали, что сигнал от границы раздела воздух–вода почти всегда превышал динамический диапазон шестизрядного АЦП. Длительность сигнала от водной среды по уровню 0,1 составляет 80 ± 300 нс в зависимости от прозрачности воды. При проведении батиметрических измерений на мелководье наблюдался второй сигнал – от дна. В наиболее чистых районах на Камчатском мелководье глубина зондирования дна достигала 20 м. При зондировании стратифицированных гидрозольных слоев или объектов промысла принимались сигналы с глубины от 5 до 25 м. Эти сигналы накладываются на задний фронт сигнала, идущего от границы раздела верхнего слоя воды. Наиболее часто этот сигнал проявляется в виде «полочки» на заднем фронте «водного» сигнала, реже в виде второго всплеска.

На рис. 3 приведен характерный сигнал, выданный графопостроителем при зондировании водной среды с высоты полета 180 м над приводным туманом. Сигнал оцифрован АЦП с временным дискретом 25 нс, что соответствует пространственному разрешению в воздухе 3,75, а в воде – 2,8 м. Из лидарного сигнала можно определить в тумане 3 слоя. Сигнал от воды хотя и ослабевает в тумане, однако его величина вполне достаточна для дальнейшей обработки и позволяет выделять импульсы от дна на мелководье.

Таким образом, лидар позволяет обнаруживать подводные образования типа косяков рыбы или слоев гидрозоя на глубинах, по крайней мере не менее 20 метров при высоте полета 100–400 м. Зондирование воды лидаром возможно при наличии приводного тумана толщиной до 100 м при полете в нижней кромке облака вне визуального наблюдения поверхности воды на высоте до 300 м, при волнении на море до 5 баллов. Лидар позволяет также определять характеристики атмосферы на трассе самолет – вода по традиционным алгоритмам.

Дальнейшие разработки по самолетным лидарам должны быть направлены как на улучшение их пространственной разрешающей способности, так и на снижение массогабаритных характеристик и энергопотребления.

1. Uthe E.E., Jenson W.B. Lidar observations the lower tropospheric aerosol structure during BOMEX. Final Report. 1971. Cone. AT(04-3)-115, SRI Project 7929, SRI, Menlo Park, Calif, USA.
2. Захаров В.М., Костко О.К., Орлов В.М. и др. — Труды ЦАО, 1971, в. 102, с. 144–149.
3. Захаров В.М., Костко О.К. — Метеорологическая лазерная локация. — Л.: Гидрометеоздат, 1977. — 222 с.
4. Самохвалов И.В. — В кн.: Дистанционные методы исследования атмосферы. — Новосибирск: Наука, 1980, с. 90–134.
5. Шаманаев В.С., Шелевой К.Д., Труханенко М.В. — В кн.: Вопросы дистанционного зондирования атмосферы. — Томск, 1975, с. 147–149.
6. Шаманаев В.С., Абрамочкин А.И. — Изв. вузов СССР, Физика, 1986, № 2, с. 125.
7. Лазерное зондирование тропосферы и подстилающей поверхности/Под ред. В.Е. Зуева. — Новосибирск: Наука, 1987. — 264 с.

СКБ научного приборостроения
«Оптика» СО АН СССР, Томск
Институт оптики атмосферы
СО АН СССР, Томск

Поступила в редакцию
11 ноября 1987 г.

A.I. Abramochkin, V.V. Zanin, I.E. Penner, A.A. Tikhomirov, V.S. Shama-
n a e v . **Airborne Polarization Lidars for Atmospheric and Hydrospheric Studies.**

Airborne polarization lidars for dense optical media sounding developed at the Institute of Atmospheric Optics and the Special Scientific Instrument Design Office «Optika» SB USSR Academy of Sciences are reported. Technical Specifications are given.

A two wavelength multifunctional lidar «Svetozar-3» for remote analysis of oriented anisotropic atmospheric particles and multiple scattering measurements is discussed in detail. Also presented is a specialized lidar «Makrel-2» designed for aqueous medium sounding from aboard an aircraft. The experimental study results are given.